

ДЕФОРМАЦИИ, СТРУКТУРА И ТЕКСТУРООБРАЗОВАНИЕ В МЕДНОЙ ПРОВОЛОКЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

STRAINS, STRUCTURE AND TEXTURE IN THE COPPER WIRE OF ELECTRO TECHNICAL APPOINTMENT

Логинов Ю.Н., Илларионов А.Г., Демаков С.Л., Иванова М.А., Карабоналов М.С.
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, unl@mtf.ustu.ru

The analysis of the stress-strain state of the structure and texture of the stages of processing copper electrical purposes.

Важнейшей сферой применения меди является производство медной проволоки электротехнического назначения. Выполненные обзоры в этой области показали, что в мире не перестают искать пути улучшения свойств этой проволоки, а также пути создания новых производств и совершенствования существующих технологий. Базовым способом производства проволоки является технологический процесс, включающий расплавление катодной меди, непрерывное литье заготовки, горячую сортовую прокатку с получением на выходе катанки диаметром 8 мм, сворачивание ее в бухту большого развеса (до 5 т), волочение на скоростных многопроходных волочильных станах с промежуточным и окончательным отжигами. Сам обрабатываемый материал представляет по существу композит, состоящий из собственно меди и частиц окиси меди. Кислородсодержащая медь обладает особыми технологическими свойствами, которые продолжают изучать исследователи как у нас в стране, так и за рубежом.

Большой комплекс работ в этом направлении выполнен в рамках федеральной целевой программы «Научные и педагогические кадры инновационной России» (2010-2012г.г.) по теме «Исследование взаимосвязи текстурного состояния со структурой и комплексом свойств в металлических материалах с различным типом кристаллической решетки» коллективами кафедры термобработки и физики металлов, кафедры обработки металлов давлением, кафедры литейного производства и упрочняющих технологий.

Ниже кратко приведен перечень работ по данной тематике.

В технологии непрерывного литья по принципу «Hazelett» было выявлено, что получаемая заготовка обладает существенно развитой анизотропией свойств[1]. Показано, что литой материал имеет неоднородное строение, характеризующееся неоднородным распределением твердости. Приведенная на рис.1 гистограмма показывает, что участки металла со средними значениями твердости относятся к дендритному пространству, участки с пониженной твердостью – к зонам повышенной пористости, участки с повышенной твердостью – к границам зерен.

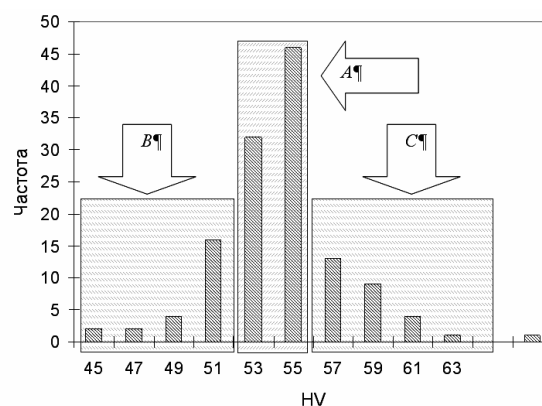


Рис.1. Гистограмма частотного распределения твердости HV: стрелка А характеризует твердость внутридендритного пространства; стрелки В и С указывают соответственно на влияние пор и границ зерен

В технологии сортовой прокатки, осуществляемой в режиме совмещенного с литьем процесса выполнен анализ энергосиловых параметров деформации с учетом эффекта Портевена - Ле-Шателье. Этот эффект применительно к меди недавно был выявлен зарубежными учеными. Он связан с колебаниями сопротивления деформации при монотонном нагружении металла. Эффект больше проявляется при высокой температуре металла и невысоких скоростях обработки. Эта ситуация характерна для начального периода непрерывной прокатки. Действительно, при изучении динамики работы литейно-прокатного агрегата по идеологии «Contirod» в условиях предприятия ЗАО СП «Катур-Инвест» было выявлено аномальное понижение энергосиловых параметров в черновой группе клетей, которое удалось объяснить вышеуказанным эффектом[2].

Большое внимание в исследованиях было уделено процессу грубого волочения проволоки. В частности, в отечественной литературе часто обходится стороной эффект скоростного упрочнения металла при волочении. На станах непрерывного многократного волочения скорость непрерывно нарастает по ходу деформации, кроме того для любого стана существует режим разгона и торможения. При проведении исследований были отобраны образцы проволоки, протянутые при большой и малой скорости волочения. Было выявлено, что волочение с большой скоростью

приводит к дополнительному упрочнению металла[3,4]. Такой эффект было трудно объяснить, пока современными методами не была исследована текстура металла. На рис.2 представлены эпюры угла отклонения компоненты $\{111\}$ вдоль относительной радиальной координаты r/R при скоростях волочения 1 м/с и 20 м/с, откуда видно, что волочение с большими скоростями приводит к уменьшению отклонения ориентировки $\{111\}$ от оси волочения.

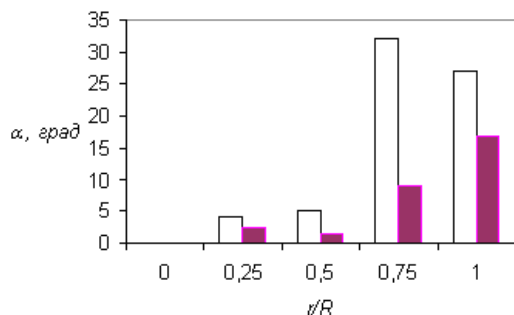


Рис. 2. Эпюра угла отклонения компоненты $\{111\}$ вдоль относительной радиальной координаты при скоростях волочения 1 м/с (светлые столбцы) и 20 м/с (темные столбцы)

Известно, что ориентация $\{111\}$ обеспечивает наиболее высокие прочностные свойства, поэтому отклонение от оси этой ориентировки вызывает уменьшение этих свойств.

Для организации непрерывности процесса волочения в современных технологиях применяют процесс стыковой сварки. При этом в промышленности постоянно ведутся дискуссии, какой тип сварки предпочтительнее: горячий, холодный или с оплавлением. Это связано с проблемой обрывности проволоки при волочении и у потребителя. Поэтому следующий этап работы

был посвящен изучению процесса холодной сварки, наиболее часто применяемый в настоящее время. Этот способ связан с интенсивной деформацией металла и его достоинство состоит в том, что он не разупрочняет уже упрочненный металл. Однако негативная сторона этого способа заключается в том, что металл в месте стыка претерпевает высокий уровень деформаций. При последующем отжиге в месте интенсивной деформации рекристаллизация начинается раньше и к моменту окончания отжига успевают пройти процессы вторичной рекристаллизации и роста зерна. Для оценки ситуации выполнены расчеты уровня деформации в этом процессе (рис.3).

Выявлено, что холодная сварка медной проволоки или катанки приводит к локальной нагартровке металла в месте шва до уровня степени относительного обжатия 97 % или степени деформации сдвига 5...6. Деформации распределены по радиусу заготовки не равномерно, наибольшие значения характерны для периферийных и центральных слоев заготовки.

Повторная сварка вызывает небольшой прирост накопленной степени деформации, этот прирост также локализован в периферийных и центральных слоях заготовки[5]. Выполненные металлографические исследования и измерение распределения микротвердости [6,7] дополнили картину процесса. Было указано на наличие зонного строения области сварки. Установлено, что из-за разницы степени деформации в месте сварки и в целом по проволоке процессы видоизменения текстур деформации и рекристаллизации металла могут развиваться по различным сценариям, что может дополнительно повысить уровень неоднородности свойств.

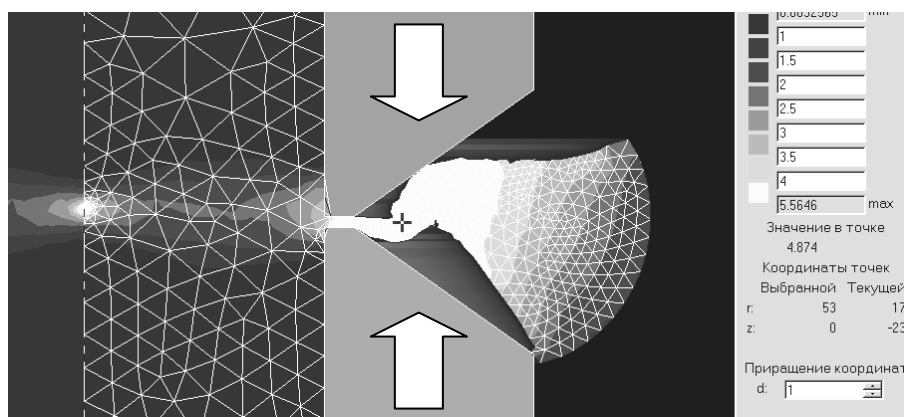
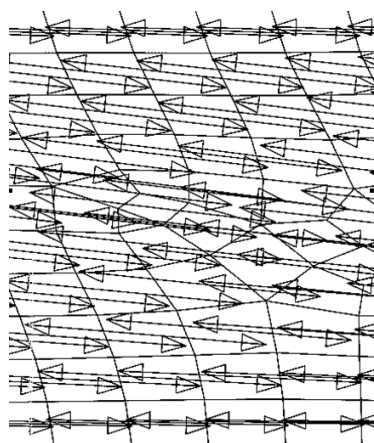


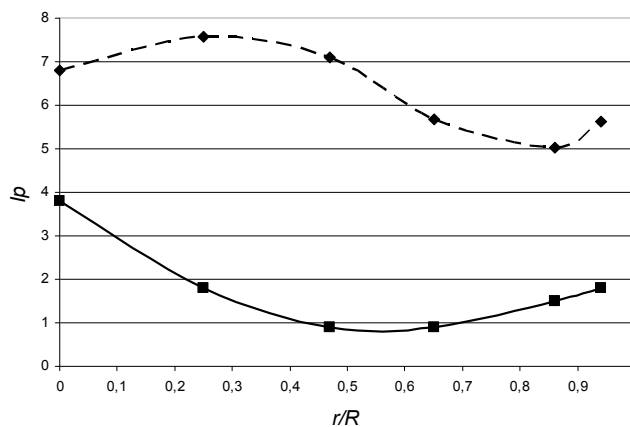
Рис. 3. Распределение деформации сдвига при вытекании обоя при сварке двух заготовок встык

По технологии производства после грубого волочения и отжига следует этап средне-тонкого волочения, который в современных условиях реализуется на машинах многопроходного и многониточного волочения. Именно здесь возникают проблемы с обрывностью проволоки. Это частично объясняется тем, что накопленная

степень деформации здесь оказывается существенно выше, чем при грубом волочении, а отжиг не предусмотрен. В данной работе были проверены дополнительные гипотезы, объясняющие это явление – это иные механизмы формирования текстуры [8].



а



б

Рис.4. Эпюры направлений главных удлинений (деформаций) на уровне калибрующего пояса волоки (а) и полюсной плотности доминирующих ориентировок $\langle 111 \rangle$ (штриховая линия) и $\langle 100 \rangle$ (сплошная линия) вдоль относительной радиальной координаты r/R

Математическим моделированием с применением метода конечных элементов в пакете ABAQUS решена задача волочения медной проволоки и выявлены наклоны направлений главных удлинений вдоль текущего радиуса заготовки (рис.4).

Выявлено, что угол наклона направлений главных удлинений при перемещении от центра заготовки к периферии увеличивается за

исключением приповерхностного слоя. Методами текстурного анализа показано доминирование ориентировки $\langle 111 \rangle$ (рис.5) и увеличение угла наклона ориентировки $\langle 111 \rangle$ от центра заготовки к периферии и связанное с этим явлением уменьшение полюсной плотности. Таким образом, установлена качественная связь между характеристиками деформированного и текстурного состояния.

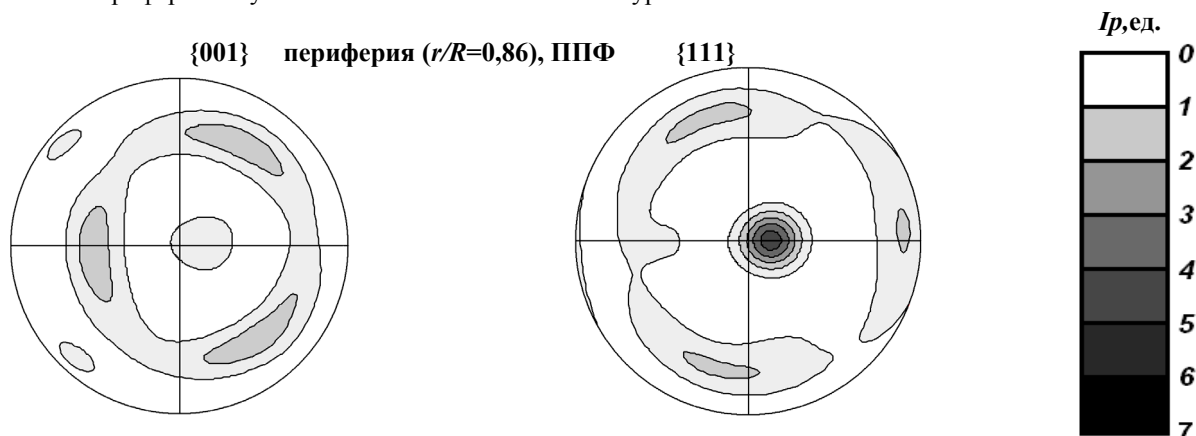


Рис.5. Прямые полюсные фигуры поперечного сечения медной проволоки

Кроме этого, возникла необходимость рассмотрения вопроса, каким образом текстура рекристаллизации, возникающая на стадии промежуточного отжига, влияет на последующий этап волочения. Действительно, после горячей прокатки происходят процессы динамической рекристаллизации и они не соответствуют процессам статической рекристаллизации, происходящим в результате промежуточного отжига. Дополнительная трудность исследования состояла в том, что промышленный отжиг не предполагает нахождения металла в пространстве печи, когда можно зафиксировать время и температуру. Рекристаллизация происходит в приставках отжига, когда проволока проходит через систему роликов и различных зон нагрева и охлаждения. Поэтому в работе были перебраны

различные температуры и временные интервалы, что позволило установить влияние этих факторов на формирование текстуры [9].

Установлено, что в процессе отжига со скоростью нагрева/охлаждения $100^\circ/\text{с}$ текстурованное состояние медной проволоки, деформированной до относительного обжатия 97%, изменяется при сохранении зонного строения. В центральной зоне при относительном текущем радиусе в пределах $0 \dots 0,3$ преобладает ориентировка $\langle 111 \rangle$ до достижения температуры 300°C , при более высоких температурах доминантной становится ориентировка $\langle 100 \rangle$, причем она не исчезает, вплоть до достижения температуры 500°C . В целом, отжиг при повышенных температурах (более 400°C) приводит к преобладанию ориентировки $\langle 100 \rangle$ и ее влияние

особенно сильно на интервале относительных радиусов 0...0,5.

Итогом работы явилось сквозное описание текстурообразования по всему переделу медной проволоки [10].

Литература

1. Логинов Ю.Н., Илларионов А.Г., Демаков С.Л., Иванова М.А., Мысик Р.К., Зуев А.Ю. Неоднородность структуры непрерывнолитой меди. Литейщик России, 2011. №11. С.28-32.
2. Логинов Ю. Н., Зуев А. Ю., Инатович Ю. В. Анализ сортовой прокатки кислородосодержащей меди с учетом немонотонности характеристик упрочнения. Цветные металлы, 2012. №7. С.73-77.
3. Логинов Ю.Н., Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Попов А.А. Влияние скорости деформации на свойства электротехнической меди. Металлы, 2011, №2. С. 31 – 39.
4. Loginov Yu.N., Demakov S.L., Illarionov, A.G., Popov A.A. Effect of the Strain Rate on the Properties of Electrical Copper. Russian Metallurgy (Metally), 2011. V. 3, P. 194–201.
5. Логинов Ю.Н., Зуев А.Ю., Копылова Т.П., Шихов С.Е. Определение уровня нагартовки медной проволоки при сварке. Кабели и провода, 2009, №6. С.3-7.
6. Loginov Yu. N., Illarionov A. G., Klyueva S. Yu., Ivanova M. A. Deformations and Structure of Metal during Cold Butt-Seam Welding of Copper Blanks. Journal of Non-Ferrous Metals, 2012, Vol. 53, No. 1. P. 45-53.
7. Логинов Ю.Н., Илларионов А.Г., Ключева С.Ю., Иванова М.А. Деформации и структура металла при холодной сварке медных заготовок. Известия вузов. Цветная металлургия. 2012, №1. С.37-44.
8. Логинов Ю.Н., Демаков С.Л., Илларионов А.Г., Карабаналов М.С. Расчет деформаций и экспериментальное исследование текстуры в нагартованной медной проволоке. Деформация и разрушение материалов. 2011, №5. С. 38-44.
9. Демаков С.Л., Логинов Ю.Н., Илларионов А.Г., Иванова М.А., Карабаналов М.С. Влияние температуры отжига на текстуру в медной проволоке. ФММ, 2012, Т.113. №7, С.1-7.
10. Демаков С.Л., Иванова М.А. Илларионов А.Г., Логинов Ю.Н. Текстурирование на этапах изготовления медной проволоки. Кабели и провода, 2012, №2. С.8-12.